

文章编号:1006-1355(2023)04-0181-06

基于控制策略的牵引系统电磁噪声优化

蒋孝文, 彭宣霖, 李 华, 贺冠强, 沈 浪

(株洲中车时代电气股份有限公司 轨道交通技术中心, 湖南 株洲 412001)

摘要:牵引系统噪声是动车组重要的噪声源,对乘客的乘坐舒适性以及环境噪声有极大的影响,而牵引电机电磁噪声又是牵引系统的主要噪声源。以某城轨动车组永磁同步牵引系统为研究对象,首先通过现场振动噪声试验解析该牵引系统永磁同步电机的振动噪声特性,锁定电机电磁噪声是造成车内噪声超标的主要原因。然后结合电磁力波理论分析,揭示电磁力谐波与电机模态共振是导致噪声超标的根本原因。进一步,基于调整输入激励达到抑制或削弱共振的思路,提出基于电机控制策略的电磁噪声抑制方法,最后通过验证实验证明优化措施的有效性,降噪量达11.9 dB,车内噪声控制在标准73 dB以下。

关键词:声学;牵引系统;永磁同步电机;电磁力;电磁噪声;共振

中图分类号: TB53

文献标志码: A

DOI编码: 10.3969/j.issn.1006-1355.2023.04.028

Electromagnetic Noise Optimization of Traction Systems Based on Control Strategy

JIANG Xiaowen, PENG Xuanlin, LI Hua, HE Guanqiang, SHEN Lang

(Technology Center, Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou 412001, Hunan, China)

Abstract: The noise of traction system is an important noise source of EMU, which has a great impact on passengers' ride comfort and environmental noise. The electromagnetic noise of traction motor is the main noise source of traction system. This paper takes the permanent magnet synchronous traction system of a city EMU as the research object. Firstly, the vibration and noise characteristics of the permanent magnet synchronous motor are analyzed through the vibration and noise experiment. It is confirmed that the electromagnetic noise of the motor is the main reason for the excessive noise in the train. Then, according to theoretical analysis of electromagnetic force waves, it is revealed that the resonance between the harmonic wave of the electromagnetic force and the modal of the motor are the root causes of the excessive noise. Furthermore, according to the idea of adjusting the input excitation to suppress or weaken the resonance, an electromagnetic noise suppression method based on the motor control strategy is proposed. Finally, the effectiveness of the optimization measures is proved by verification experiments. The noise reduction amount reaches 11.9 dB and the interior noise is controlled below 73 dB.

Key words: acoustics; traction system; PMSM; electromagnetic force; electromagnetic noise; resonance

动车组牵引系统主要包括牵引变压器、牵引变流器和牵引电机等关键设备^[1]。牵引变压器为牵引变流器提供的交流电源,经牵引变流器的整流电路和逆变器后驱动牵引电机,牵引电机分为交流异步牵引电机和永磁同步电机等。永磁同步电机损耗低、效率高以及优异的调速和起制动性能,使得永磁同步牵引系统符合节能减排、绿色环保的技术发展要求,成为下一代牵引系统的发展方向。

永磁同步电机噪声在运行中产生的噪声分为电

磁噪声、气动噪声及机械噪声三类。气动噪声和机械噪声一般分布在人耳不敏感的低频段,而电磁噪声主要集中在人耳敏感的中高频段范围,是牵引系统的主要噪声源,其直接影响到乘客的乘坐舒适性。逆变器驱动的永磁同步电机,电机输入电源存在大量谐波,使电机产生振动和噪声^[2]。尤其是分数槽绕组磁势谐波、逆变器脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)引起的时间谐波所产生的电磁噪声较为突出,而噪声指标要求日益提高^[3],因此有必要探究电磁噪声的抑制方法。

永磁同步电机电磁力及模态是决定电机电磁噪声的关键因素,而电磁力的低次谐波是主要激励源^[4],同一阶次的电磁力波有众多来源,并表征出不同的频率特性。对于弱磁调速的永磁同步电机,随

收稿日期:2022-03-14

作者简介:蒋孝文(1995—),男,湖南省娄底市人,工程师,专业方向为轨道交通电气设备振动噪声控制技术研究。

E-mail: xiaowen9782@qq.com

着弱磁调速范围的扩大,基波分量逐步减小,谐波分量逐步增加^[5]。韩雪岩等^[6]发现整数槽的极槽配合以及每极槽数更多的极槽配合更能抑制电机振动噪声。分数槽永磁同步电机相比整数槽更容易产生低次径向电磁力波^[7]。王宇等^[8]提出合理减小定子槽口宽度和选取合适的磁体宽度能降低电磁力幅值。王晓远等^[9]提出一种电动汽车永磁同步电机转子隔磁桥结构,改变了电机定子齿部的电磁激振力,降低了电机的振动噪声。宗立佳^[10]提出变更脉宽来削减电流谐波,进而调控电机噪声。刘小华等^[11]将一台电动-气驱动电机固定开关频率控制策略修改为随机PWM频率,以此分散高频谐波频率噪声。降低电机的电磁噪声,可从两方面入手:一方面是从电机本体角度优化设计电磁结构来削弱噪声^[12],其优化设计周期长,改造成本高;另一方面是通过优化电机控制策略,弱化电磁力对电机的激励,能更有效地降低电磁噪声。

本文首先研究某款城轨动车组永磁同步牵引系统振动噪声特性及噪声超标原因,然后提出一种电磁噪声优化控制策略,通过磁链轨迹跟踪控制技术和开关频率分布优化来降低电机电流谐波含量和优化谐波分布,从而获得逆变器与电机的最优匹配工作点,达到优化牵引系统电磁噪声的目的。

1 永磁同步电机电磁力理论

1.1 变流器供电的电机气隙磁场谐波

对于轨道交通的牵引系统,由于电机功率大、功率器件的开关损耗等原因,变流器的开关频率通常低于600 Hz,与工业变流器2 kHz~15 kHz相差甚远,所以牵引电机的输入电源中谐波含量较高。PWM调制也会引入器件开关频率 f_k 及其倍频的谐波,此外,电机在不同速度范围还会采用不同的控制方式,变流器开关频率也随之发生变化,从而使牵引电机的输入电流中存在着丰富的谐波成分。

除去频率为 f_0 (定子频率)的基波电流外,还存在两类主要的谐波分量^[13]:

第一类是基波的高次谐波:

$$f = (6k \pm 1) f_0, k = 1, 2, 3 \dots \quad (1)$$

第二类是开关频率及其倍频与基波调制产生的谐波:

$$f = af_k \pm bf_0, a = 1, 2, 3 \dots, b = 1, 2, 3 \dots \quad (2)$$

1.2 电机电磁力波特性

根据麦克斯韦定理^[2],气隙中单位径向电磁力为:

$$P_r = \frac{B^2(\theta, t)}{2\mu_0} \quad (3)$$

式中: $B(\theta, t)$ 为气隙磁密, μ_0 为空气磁导率。

牵引电机在变流器供电下产生的径向电磁力波主要有如下三种:

(1) n 次谐波主磁场产生的电磁力:

考虑到只有交变力才会引发振动噪声,分析时忽略了电磁力波的不变项。因此, n 次谐波主磁场产生的电磁力可以表示为:

$$P_n = \frac{B_n^2(\theta, t)}{2\mu_0} = \cos(2p\theta - 2nf_0t) \quad (4)$$

该电磁力波的频率 $f_n = 2nf_0$,力波次数 $r_n = 2p$,其中 p 为电机极对数。在变流器供电条件下,这类电磁力波的典型代表为基波的主磁场产生的电磁力与开关频率谐波主磁场产生的电磁力。

(2) n 次谐波与 m 次谐波相互作用产生的电磁力:

由于变流器供电电源中存在丰富的谐波成分,各阶次谐波相互作用产生的电磁力波的表达式为:

$$P_{n,m} = \frac{B_n(\theta, t)B_m(\theta, t)}{2\mu_0} = \cos[2p\theta - (n+m)f_0t] + \cos[(n-m)f_0t] \quad (5)$$

相比于基波磁场而言,各次谐波的幅值很小,因此可以忽略高次谐波之间的相互作用,仅考虑各次谐波磁场与基波磁场的相互作用。取 $m=1$ 时,这类电磁力波的频率为 $f_{n,1} = (n+1)f_0$,阶数 $r_{n,1} = 2p$;或频率为 $f_{n,1} = (n-1)f_0$,阶数 $r_{n,1} = 0$ 。

(3) 齿谐波(定转子绕组谐波)磁场产生的电磁力:

这种类型的力波频率为:

$$f_{\nu,\mu} = f_0[k_2 \frac{Z_2}{p}(1-s) + 2], \text{力波次数为 } r = \nu + \mu;$$

或频率为:

$$f_{\nu,\mu} = f_0 k_2 \frac{Z_2}{p}(1-s), \text{力波次数为 } r = \nu - \mu。$$

其中: Z_2 为转子槽数, s 为转差, $\nu = (6k_1 + 1)p$ 为定子绕组磁场阶次, $\mu = k_2 Z_2 + p$ 为转子绕组磁场阶次。

1.3 电磁噪声抑制策略

永磁同步牵引系统的电磁噪声的抑制是一个系统性问题。对于电机本体而言,有调整定转子槽配合、定转子斜槽处理、设计绕组形式及气隙大小等方式。在电机控制策略方面,对于逆变器供电产生开关频率及其倍频谐波激励,可以平移开关频率或随机扩频调制策略;对于定转子间谐波磁场相互作用产生的各阶次电磁力,通过多边形磁链轨迹控制技术,抑制或削减目标阶次谐波电流,以此避免或削弱电机模态共振发声。

2 牵引系统振动噪声特性的研究

本文对某城轨动车组永磁同步牵引系统进行了振动噪声试验研究,测试在列车试验线上进行,试验场地开阔,环境噪声低于被试噪声 15 dB,满足测试标准要求,无须进行结果修正。在车厢内人耳高度位置布置麦克风,即电机正上方的车厢内距离地板上方 1.6 m 高处;在电机外壳布置三轴加速度传感器,采集电机定子振动信号;在电机轴处布置激光转速传感器。试验测点如图 1 所示。



(a) 车厢内噪声测点

(b) 电机外壳振动测点

图 1 振动噪声测试试验

试验过程中,电机转速控制在 1 000 r/min 内,即车体由静止状态迅速加速至 30 km/h,然后匀速运行约 5 s 后开始制动,使车体减速至 0。为排除车内空调系统带来的噪声干扰,实验过程中将空调关闭。

牵引加速阶段车厢内噪声测点声压级时频图如图 2 所示,600 r/min 以下主要是牵引变流器 IGBT 开关频率引入的激励导致的振动发声,750 r/min 以上主要是 56 阶电磁力导致的振动发声,同时也存在 48、64 和 72 等阶次径向电磁力,但影响相对较小。电机在 750 Hz 和 896 Hz 两个频率附近存在模态,如图 3 所示。

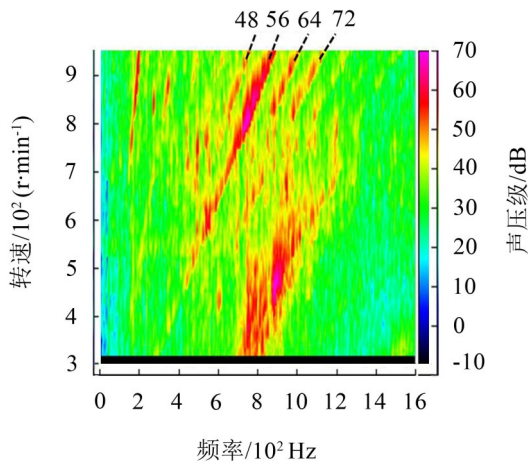


图 2 牵引阶段车厢内噪声时频图

牵引加速阶段车厢内噪声时域结果如图 4 所示,在 470 r/min 和 810 r/min 两个转速点附近噪声超

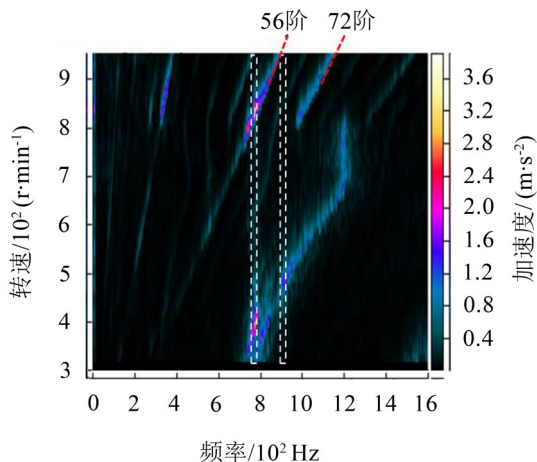


图 3 电机机壳振动时频图

出 73 dB 的标准,作噪声切片如图 5 所示。470 r/min 时的噪声峰值主要影响频率为 896 Hz,由前述分析知电机在该频率附近存在模态,且该转速下主要激励为 IGBT 开关频率引入的激励,因此可以确定该转速下噪声超标的主要原因为开关频率两倍频的电磁激励引起电机的共振,从而辐射噪声;810 r/min 时刻噪声主要贡献频率是 750 Hz,而此时 56 阶电磁力频率也为 756 Hz,电机在 750 Hz 附近存在模态,因此可以认为转速在 810 r/min 的噪声峰值主要是 56 阶电磁力引起的电机在 750 Hz 的模态共振辐射噪声。

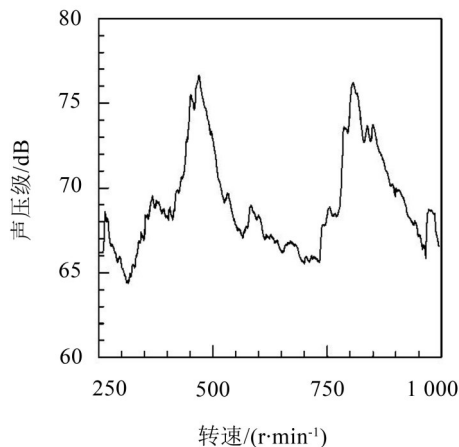


图 4 车厢内噪声测点牵引加速阶段声压级时域图

3 牵引系统噪声阶次分析与优化设计

3.1 噪声阶次分析

根据电磁理论进行电磁力波分析,主极磁场的谐波极对数: $\mu = (2r + 1)p, r = 0, 1, 2, \dots$; 每极每相分数槽 $q = b + c/d = (bd + c)/d$ 的定子绕组谐波极对数: $\nu = (\frac{6k}{d} + 1) \cdot p, k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 。电机定子磁场相互作用产生的主要电磁力波极对数: $n = \mu \pm \nu$, 径向力波频率: $f = (\mu \pm p)f_r$, 其中 f_r 为电机转频^[14]。

[illegible]

转速段,由前文分析知噪声成因为56阶齿谐波导致的共振发声,但同时也存在作用相对较小的48、64和72等阶次径向电磁力,因此可调整电机控制策略优化各阶次电磁力能量分布,进而削弱噪声,即在供给电机电流大小一定的情况下,根据能量守恒原理,我们可以调整其他阶次径向电磁力的能量,以此分散56阶齿谐波的激励能量,进而削弱电机共振,达到噪声抑制的效果。

本文的永磁同步电机转速到达810 r/min前后时,56阶齿谐波激起电机750 Hz模态共振,而56阶齿谐波是由电机本身的设计参数所决定的,无法通过控制策略改变其阶次数。基于前述思路,应当调整电机控制程序,使电机在转速达到810 r/min之前便已经切换进入同步阶段,并利用同步阶段的24、32、40、48、64和72阶等径向电磁力波分散56阶齿谐波能量,进而削弱750 Hz共振。但是也应注意到,若是过早地切换到同步阶段,则72阶电磁力将有激起电机896 Hz处模态的共振的风险。由共振的理论知,共振现象的发生是激振力频率接近物体固有频率而激起的,因此存在图6所示的小块状共振区。

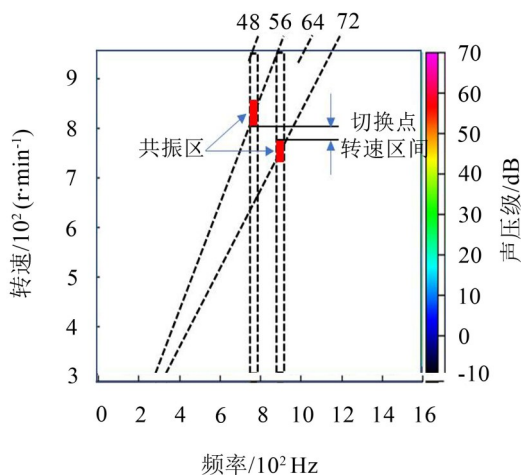


图6 电机共振区及合适的切换点转速区间示意图

综上所述,该款永磁同步电机理论上存在一个狭窄的速度范围适合作为同步阶段切换点。

4 试验验证与分析

原程序的控制策略为电机异步阶段采用线性升高开关频率的方式。程序1采用提高变流器开关频率的方式,即将电机异步阶段开关频率提高至一定值,并保持恒定至切换点转速。

优化后的程序1与原程序下车厢噪声情况对比如图7所示,600 r/min以下转速段噪声情况优化效果明显,降噪量约为8 dB~12 dB,其中470 r/min转速下噪声降低11.9 dB,这是因为调整开关频率后,开关频率2倍频激励避开了电机896 Hz共振区,如

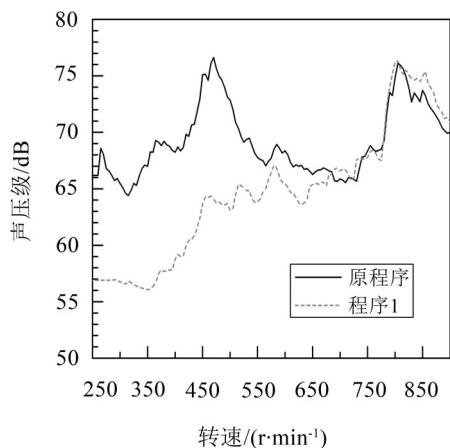


图7 原程序和程序1噪声对比

图8的噪声时频图所示。

试验探究对比了多版切换点转速的控制程序下的噪声,电机转速为765 r/min时切换进入同步的噪声相对较优。

程序2基于程序1的控制策略,确定切换点转速为765 r/min,并通过多边形磁链轨迹跟踪控制技术调整阶次谐波电流,车厢内噪声声压级如图9所示,0~30 km/h牵引工况下车厢内噪声已经满足了73 dB标准。

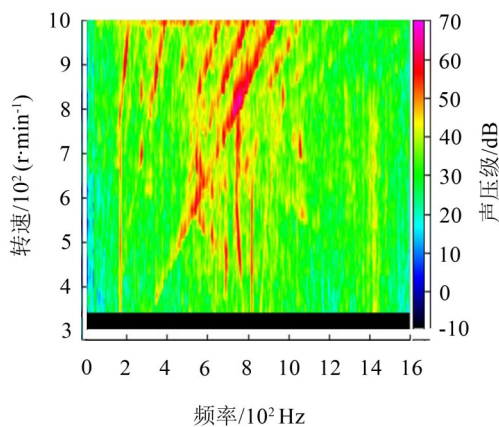


图8 程序1噪声时频图

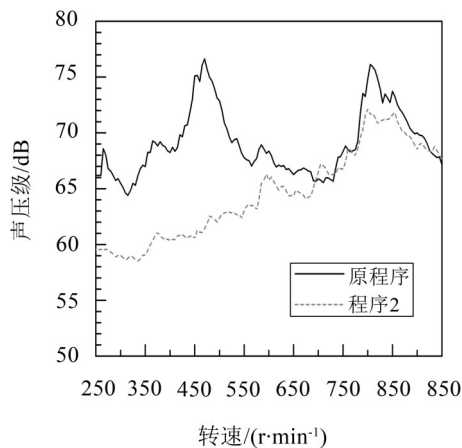


图9 原程序与程序2噪声对比

图10所示为优化程序下车厢内噪声时频图,可知在该版控制程序下,电机进入同步阶段后出现了12、24、32、40、48、64和72阶等径向电磁力,转速在810 r/min时,电机的24、40、48和64阶径向电磁力分散了56阶齿谐波能量,削弱了750 Hz模态共振,因此在这个转速附近噪声降低了3.9 dB,并且72阶径向力影响不大,也避免了该阶电磁力造成896 Hz处模态的共振的风险。

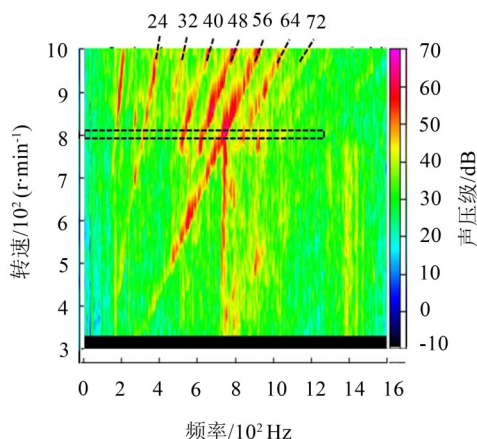


图10 程序2车厢内噪声时频图

5 结语

本文对某城轨动车组永磁同步驱动系统,基于理论计算和振动噪声试验分析,发现IGBT开关频率引入的激励和牵引变流器引入的谐波激励与电机模态共振是造成电机噪声超标的主要原因。提出了一种基于控制策略优化的电磁噪声抑制方法,有效削弱了电磁力波激励与电机模态共振,降噪量达11.9 dB,车内噪声控制在标准73 dB以下,对同类型电机降噪具有参考和借鉴意义。

参考文献:

- [1] 邹档兵,孙亚运. 城际动车组牵引系统技术分析及展望[J]. 电力机车与城轨车辆, 2022, 45(2): 7-15.
- [2] 黄宇峰. 逆变器供电对牵引电机电磁噪声的影响[J]. 自动化应用, 2016(5): 85-87.
- [3] 彭俊,李伟业,冯江华,等. 逆变器供电下的永磁同步电机电磁噪声计算[J]. 机车电传动, 2019(1): 30-34+39.
- [4] 江爽. 电动汽车用永磁同步电机电磁噪声计算与分析[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2021.
- [5] 薛建,程振涛,彭秋阳. 电主轴用宽弱磁调速范围永磁同步电机径向电磁力研究[J]. 机电工程技术, 2019, 48(8): 29-32.
- [6] 韩雪岩,张新刚,朱龙飞,等. 内置式多层磁钢永磁同步电机振动噪声抑制措施[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(8): 67-75.
- [7] 阮博,谷爱昱,刘海,等. 分数槽永磁同步电机径向电磁力研究[J]. 电机技术, 2019(2): 12-16.
- [8] 王宇,郝志勇. 基于电磁力分析的永磁同步电机研究及优化[J]. 现代机械, 2020(2): 27-31.
- [9] 王晓远,贺晓钰,高鹏. 电动汽车用V型磁钢转子永磁电机的电磁振动噪声削弱方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(16): 4919-4926+4994.
- [10] 宗立佳. 变频器供电对永磁电机振动噪声源的影响探究[J]. 科技创新与应用, 2016(22): 138-139.
- [11] 刘小华,莫崇卫,蒋帅,等. 某纯电动汽车驱动电机噪声分析与优化[J]. 噪声与振动控制, 2019, 39(5): 68-72+95.
- [12] 崔康宁. 永磁同步电机电磁振动抑制方法研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2020.
- [13] 唐任远,宋志环,于慎波,等. 变频器供电对永磁电机振动噪声源的影响研究[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(3): 12-17.
- [14] 陈永校,诸自强,应善成. 电机噪声的分析和控制[M]. 杭州:浙江大学出版社, 1987.

(上接第26页)

- [4] VAPNIK V. The nature of statistical learning theory[M]. New York: Springer Verlag, 1999.
- [5] TANG L, TIAN Y, YANG C. Nonparallel support vector regression model and its SMO-type solver[J]. Neural Networks, 2018, 105: 431-446.
- [6] YE Y, GAO J, SHAO Y, et al. Robust support vector regression with generic quadratic nonconvex ϵ -insensitive loss[J]. Applied Mathematical Modelling, 2020, 82: 235-251.
- [7] JIN R, CHEN W, SIMPSON T W. Comparative studies of metamodeling techniques under multiple modelling criteria[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2001, 23(1): 1-13.
- [8] CHEN L, WANG H, FAN Y, et al. Comparative study of HDMRs and other popular metamodeling techniques for high dimensional problems[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2019, 59(1): 21-42.
- [9] ZHAN Z, FU Y, YANG R J, et al. An enhanced Bayesian based model validation method for dynamic systems[J]. Journal of Mechanical Design, 2011, 133(4).
- [10] JIA L, ALIZADEH R, HAO J, et al. A rule-based method for automated surrogate model selection[J]. Advanced Engineering Informatics, 2020, 45: 101123.
- [11] SURJANOVIC S, BINGHAM D. Virtual library of simulation experiments: Test functions and datasets [EB/OL]. <http://www.sfu.ca/~ssurjano>, February 24, 2022.